

Système de contrôle d'un débit d'argon en sortie d'une colonne de distillation

5 Le domaine de l'invention se rapporte au contrôle d'un débit d'argon en sortie d'une colonne de distillation. En particulier, la modification du débit d'argon d'un fluide en sortie d'une colonne de distillation permet de modifier la teneur en dioxygène de ce fluide et ainsi d'en améliorer la pureté en argon. La distillation est effectuée à des températures cryogéniques.

10 La distillation est un procédé de séparation des différents constituants d'un mélange liquide homogène. En effet, ces constituants présentent généralement des températures d'ébullition (ou températures de vaporisation) distinctes de sorte que, sous l'effet de l'augmentation de la température, les constituants du mélange liquide vont se transformer en gaz à des températures différentes, ce qui permet ainsi de les séparer les uns des autres.

15 En particulier, il est possible de séparer les différents constituants d'un mélange d'air liquide et ainsi d'isoler du diazote, du dioxygène mais aussi des gaz rares, notamment l'argon.

20 La séparation de l'argon des autres constituants de l'air pour obtenir un fluide d'argon aussi pur que possible présente un réel intérêt et a de nombreuses applications industrielles. L'argon étant un gaz inerte, il est par exemple employé comme atmosphère pour des réactions chimiques. L'argon est en outre très utilisé dans la fabrication des ampoules incandescentes puisqu'il présente l'avantage de ne pas réagir avec le filament de l'ampoule.

La pureté de l'argon est bien souvent caractérisée par la teneur en dioxygène résiduel dans le fluide d'argon obtenu en sortie d'une colonne de distillation et l'amélioration de la pureté de l'argon est donc un problème récurrent.

25 Bien souvent, les procédés et systèmes d'amélioration de la pureté de l'argon ne prennent pas en considération certains critères comme le taux de dioxygène en sortie de colonne de distillation, le délai inhérent au fonctionnement de la colonne de distillation, les perturbations extérieures ou encore le biais introduit par le ou les régulateurs habituellement utilisés.

La présente invention vient améliorer la situation.

L'invention dont il est question ici concerne un système de contrôle d'un débit d'argon d'un fluide en sortie d'un ensemble d'au moins une colonne de distillation pour atteindre un taux de dioxygène cible. Le système comprend :

- un capteur agencé pour mesurer un taux de dioxygène dans un fluide comprenant de l'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
- un régulateur agencé pour déterminer une variation de débit d'argon requise en fonction de la différence entre le taux de dioxygène mesuré par le capteur et un taux de dioxygène cible,
- un contrôleur agencé pour générer un signal de commande relatif à un débit d'argon visé, ledit débit d'argon visé étant déterminé en fonction de la variation de débit d'argon requise déterminée par le régulateur et de variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur et
- une vanne, pilotée par ledit contrôleur, agencée pour modifier le débit d'argon du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation pour obtenir le débit d'argon visé.

Les variations du débit du fluide comprenant de l'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation ont en effet un impact direct sur le taux de dioxygène de ce fluide. Ainsi, le système décrit ici détermine un débit d'argon, à savoir le débit d'argon visé, pour atteindre le taux de dioxygène cible.

- Dans un ou plusieurs modes de réalisation, l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est alimenté par un fluide d'air, le débit d'argon visé déterminé par le contrôleur étant déterminé en fonction en outre d'une valeur prédictive du débit d'argon fonction du débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation et d'un rendement dudit ensemble.

- Selon un aspect de l'invention, la valeur prédictive du débit d'argon est fonction d'un débit d'air retardé relatif au débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation, ledit d'air retardé étant défini comme suit :

$$Q_{\text{air}}^*(t) = Q_{\text{air}}(t) \text{ tant que } Q_{\text{air}}(t) - Q_{\text{air}}(t - \delta) < R$$

si, à $t = t_0$, $R \leq Q_{\text{air}}(t_0) - Q_{\text{air}}(t_0 - \delta)$, alors:

$$Q_{\text{air}}^*(t) = Q_{\text{air}}(t_0 - \lambda) \text{ pour tout } t \in [t_0; t_0 + \lambda[$$

où :

- $Q_{\text{air}}^*(t)$ est le débit retardé à l'instant t ,
- $Q_{\text{air}}(t)$ est le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation à l'instant t ,
- t_0 est un instant quelconque,
- 5 • λ et δ sont des périodes de temps prédéterminées,
- R est un seuil prédéterminé positif.

Selon un autre aspect de l'invention, la valeur prédictive du débit d'argon à un instant donné est déterminée comme suit :

10

$$Q_{\text{pred}}(t) = Q_{\text{air}}^*(t) \times \alpha \times \rho$$

où :

- $Q_{\text{pred}}(t)$ est la valeur prédictive du débit d'argon à un instant t donné,
- α est la proportion d'argon dans le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins
15 une colonne de distillation,
- ρ est le rendement de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,

Selon un autre aspect de l'invention, le rendement de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est déterminé par application d'une fonction prédéterminée à un facteur caractérisant une quantité d'énergie utilisée pour le fonctionnement de l'ensemble d'au moins une colonne
20 de distillation.

Selon un autre aspect de l'invention, la fonction prédéterminée est déterminée par un algorithme d'apprentissage sur la base d'un ensemble de données relatives à une pluralité de processus de distillation mis en œuvre selon différentes valeurs de quantité d'énergie sollicitée.

Selon un autre aspect de l'invention, la fonction prédéterminée est polynômiale.

- 25 Dans un ou plusieurs modes de réalisation, le débit d'argon visé est déterminé en fonction d'un paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur, ledit paramètre d'anticipation prenant des valeurs discrètes dans un ensemble de valeurs prédéterminées.

30 Comme expliqué précédemment, le taux de dioxygène mesuré par le capteur est celui du fluide comprenant de l'argon en sortie de l'ensemble d'au moins au moins une colonne de distillation.

Ce fluide est donc issu de la partie supérieure d'une colonne de distillation où le taux de dioxygène varie de manière non-linéaire. Le régulateur, et plus particulièrement un régulateur PID, n'est pas adapté à la non-linéarité et ne permet donc pas de réguler de manière satisfaisante le taux de dioxygène en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation. Aussi, un tel paramètre d'anticipation est complémentaire du régulateur et corrige donc les approximations dues à la non-linéarité du taux de dioxygène dans la partie supérieure d'une colonne de distillation.

Selon un aspect de l'invention, le paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène est défini comme suit :

$$P(t) = \begin{cases} P_1 & \text{si } |PV(t) - PV(t - \tau)| \leq S \\ P_2 & \text{si } PV(t) - PV(t - \tau) > S \\ P_3 & \text{si } PV(t) - PV(t - \tau) < -S \end{cases}$$

où :

- $P(t)$ est la valeur du paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur à l'instant t ,
- P_1, P_2, P_3 sont des valeurs possibles du paramètre d'anticipation selon les variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur,
- $PV(t)$ est la valeur du taux de dioxygène mesuré par le capteur à l'instant t ,
- τ est une période de temps prédéterminée, et
- S est un seuil prédéterminé.

Les variations du taux de dioxygène lorsque celui-ci est régulé par un régulateur, et plus spécifiquement un régulateur PID, sont connues à l'avance et permettent donc de déterminer les valeurs possibles du paramètre d'anticipation.

Selon un autre aspect de l'invention, le paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur est un débit correctif, le débit d'argon visé étant déterminé comme suit :

$$Q_{\text{argon}} = Q_{\text{pred}} + \Delta_{\text{regul}} + P$$

où :

- Q_{argon} est le débit d'argon visé,
- Q_{pred} est la valeur prédictive du débit d'argon,

- Δ_{regul} est une variation de débit d'argon requise, et
- P la valeur du débit correctif.

Selon un autre aspect de l'invention, le paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur est un coefficient de pondération de la valeur prédictive du débit d'argon, le débit d'argon visé étant déterminé comme suit :

$$Q_{argon} = Q_{pred} \times P + \Delta_{regul}$$

où :

- Q_{argon} est le débit d'argon visé,
- Q_{pred} est la valeur prédictive du débit d'argon,
- Δ_{regul} est une variation de débit d'argon requise, et
- P la valeur du coefficient de pondération de la valeur prédictive du débit d'argon.

Dans un ou plusieurs modes de réalisation, la valeur prédictive de débit d'argon est pondérée par un facteur correctif relatif à des perturbations de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation, ledit facteur correctif étant déterminé en fonction de la différence entre le taux de dioxygène mesuré par le capteur et le taux de dioxygène cible.

Selon un aspect de l'invention, le facteur correctif est défini comme suit :

$$K = \begin{cases} K_1 \text{ si } PV(t) - SP \geq T_1 \\ K_2 \text{ si } T_2 < PV(t) - SP < T_1 \\ K_3 \text{ si } PV(t) - SP \leq T_2 \end{cases}$$

où :

- K_1 , K_2 et K_3 sont des valeurs prédéterminées possibles du facteur correctif, et
- T_1 et T_2 sont des seuils prédéterminés.

Dans un ou plusieurs modes de réalisation, le régulateur est un régulateur PID (« *Proportionnel-Intégral-Dérivé* ») configuré de sorte que les valeurs des paramètres respectivement relatifs aux contributions proportionnelles et intégrales du régulateur PID sont multipliées par deux lorsque le taux de dioxygène mesuré par le capteur est supérieur au taux de dioxygène cible.

Selon un aspect de l'invention, le régulateur PID est un régulateur PI.

Dans un ou plusieurs modes de réalisation, le taux de dioxygène cible du fluide d'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est inférieur à 2 ppm.

Avantageusement, le taux de dioxygène cible du fluide d'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est compris entre 0,9 ppm et 2 ppm.

- 5 Préférentiellement, le taux de dioxygène cible du fluide d'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est égal à 0,9 ppm.

Ces valeurs sont particulièrement avantageuses. En effet, le ratio d'argon récupéré en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation dépend directement du taux de dioxygène en sortie de cet ensemble. Un taux de dioxygène de 0,9 ppm représente la valeur minimale
10 permettant d'atteindre un ratio maximal d'argon récupéré entre le fluide de sortie de la dernière colonne de distillation de l'ensemble et le fluide d'entrée de cette dernière colonne.

L'invention concerne en outre un procédé de contrôle d'un débit d'argon d'un fluide en sortie d'un ensemble d'au moins une colonne de distillation pour atteindre un taux de dioxygène cible. Le procédé comprend :

- 15 - mesurer un taux de dioxygène dans un fluide comprenant de l'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
- déterminer une variation de débit d'argon requise en fonction de la différence entre le taux de dioxygène mesuré et un taux de dioxygène cible,
- déterminer, en fonction de la variation de débit d'argon requise et de variations du
20 taux de dioxygène mesuré, un débit d'argon visé, et
- modifier le débit d'argon du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation pour obtenir le débit d'argon visé.

Enfin, l'invention concerne également un programme informatique comprenant des instructions pour la mise en œuvre du procédé décrit précédemment, lorsque ces instructions sont exécutées
25 par au moins un processeur.

D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après, et à l'analyse des dessins annexés, sur lesquels :

- la **Figure 1** illustre un ensemble d'au moins une colonne de distillation et un système selon l'invention comprenant un capteur de mesure du taux de dioxygène d'un fluide en

sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation, un régulateur, un contrôleur et une vanne ;

- la **Figure 2** illustre les variations du débit d'un fluide d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation, ainsi que les variations d'un débit d'air retardé utilisé par le contrôleur pour déterminer un débit d'argon visé du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation ;
- la **Figure 3** illustre des variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation ;
- la **Figure 4** illustre le régulateur selon un mode de réalisation dans lequel le régulateur est de type PID ;
- la **Figure 5** illustre le rendement d'argon obtenu en fonction du taux de dioxygène du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation ; et
- la **Figure 6** illustre un procédé de contrôle du débit d'argon du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation selon l'invention.

- 15 La **Figure 1** illustre un ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation et un système 3 de contrôle d'un débit d'argon d'un fluide en sortie de l'ensemble 1.

L'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation est agencé pour mettre en œuvre un ou plusieurs processus de distillation d'un mélange homogène dont un des constituants est l'argon (élément chimique de notation « Ar » dans la table périodique des éléments).

- 20 Typiquement, l'ensemble 1 comprend plusieurs colonnes de distillation successives, chacune mettant en œuvre un processus de distillation, de sorte que le fluide en entrée d'une colonne de distillation est le fluide de sortie de la colonne de distillation précédente. Par ailleurs, l'ensemble 1 est alimenté, par exemple, par un fluide d'air. L'air comprend, en effet, de l'argon. La teneur en argon dans l'air est environ de 0,93%. On comprend donc que ce fluide d'air est injecté
- 25 comme entrée de la première colonne de distillation 5 de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Bien entendu, d'autres mélanges homogènes comprenant de l'argon peuvent être utilisés comme entrée de l'ensemble 1.

Dans l'exemple illustré en **Figure 1**, l'ensemble 1 comprend deux colonnes de distillation, à savoir une première colonne de distillation 5 et une deuxième colonne de distillation 7.

- 30 La première colonne de distillation 5 est agencée pour être alimentée par un flux d'air 100 caractérisé par un débit d'air Q_{air} . Par ailleurs, le débit d'air Q_{air} de ce fluide peut être variable

au cours du temps. A titre d'exemple, la **Figure 2** illustre des variations du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation, et plus exactement en entrée de la première colonne de distillation 5. Dans l'exemple illustré en **Figure 2**, le débit d'air Q_{air} augmente avec une pente élevée entre $t = 0$ minute et $t = 140$ minutes. Puis, entre $t = 140$ minutes et $t = 200$ minutes, le débit d'air Q_{air} continue d'augmenter mais avec une pente faible. Enfin, le débit d'air Q_{air} décroît entre $t = 200$ minutes et $t = 280$ minutes.

La première colonne de distillation 5 est agencée en outre pour mettre en œuvre un processus de distillation de manière à émettre en sortie un fluide 110. Ce fluide 110 présente une teneur en argon plus élevée que le fluide d'air 100 en entrée de la première colonne de distillation 5.

La deuxième colonne de distillation 7 est agencée pour être alimentée par le fluide 110. L'homme du métier comprend que d'autres opérations, non représentées ici, peuvent être mises en œuvre entre deux colonnes de distillation successives. Par exemple, le fluide 110 est un gaz en sortie de la première colonne de distillation 5 mais est un liquide en entrée de la deuxième colonne de distillation 7. La deuxième colonne de distillation 7 est agencée en outre pour mettre en œuvre un processus de distillation de manière à émettre, comme illustré en **Figure 1**, un fluide 120 en sortie. Ce fluide présente une teneur en argon plus élevée que le fluide 110 en entrée.

Le système 3 est agencé pour contrôler le débit d'argon du fluide 120 en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Dans le cas décrit ici, le fluide 120 correspond au fluide en sortie de la deuxième colonne de distillation 7. Le contrôle du débit d'argon a pour conséquence la modification du taux de dioxygène du fluide 120.

On comprend donc ici que le système 3 est en fait agencé pour atteindre un taux de dioxygène cible dans le fluide 120 en modifiant le débit d'argon du fluide 120. En d'autres termes, le contrôle du débit d'argon est le levier utilisé, au moyen du système 3, pour améliorer la pureté de l'argon en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation.

Comme illustré en **Figure 1**, le système 3 comprend un capteur 9, un régulateur 11, un contrôleur 13 et une vanne 15.

Le capteur 9 est agencé pour mesurer le taux de dioxygène du fluide 120 en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Avantagusement, la valeur PV du taux de dioxygène du fluide 120 est mesurée en temps réel. Dans la suite de la description, on pourra donc également utiliser la notation $PV(t)$ pour désigner la valeur du taux de dioxygène du fluide 120

à un instant t donné. Ici, le capteur 9 est positionné en sortie de la deuxième colonne de distillation 7. Plus exactement, on comprend donc que le capteur 9 est positionné au niveau de la partie supérieure de la deuxième colonne de distillation 7, à savoir la partie de la deuxième colonne de distillation 7 dont est extrait le fluide 120.

- 5 La **Figure 3** illustre un exemple de variations du taux de dioxygène mesuré PV par le capteur 9 en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation.

Le capteur 9 est agencé en outre pour transmettre la valeur $PV(t)$ de taux de dioxygène mesurée au régulateur 11 à l'instant t . Avantageusement, le capteur 9 est également agencé pour transmettre la valeur de taux de dioxygène mesurée $PV(t)$ au contrôleur 13.

- 10 Le capteur 9 comprend une mémoire 17 et un processeur 19.

La mémoire 17 est configurée pour stocker des instructions dont la mise en œuvre par le processeur 19 se traduit par le fonctionnement du capteur 9.

- Avantageusement, la mémoire 17 est agencée en outre pour stocker des données relatives aux variations du taux de dioxygène du fluide 120 mesuré en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une
15 colonne de distillation.

Le régulateur 11 est agencé pour recevoir la valeur PV du taux de dioxygène mesurée par le capteur 9. Avantageusement, le régulateur 11 reçoit la valeur PV du taux de dioxygène en temps réel. D'autre part, le régulateur 11 reçoit aussi en entrée une valeur cible SP de taux de dioxygène. Dans la suite de la description, on parlera également de taux de dioxygène cible SP.

- 20 Ce taux de dioxygène cible SP est une valeur prédéterminée correspondant au taux de dioxygène désiré pour le fluide 120 en sortie de l'ensemble 1. Cette valeur cible SP peut également être qualifiée de consigne.

Dans un ou plusieurs modes de réalisation, le taux de dioxygène cible est inférieur ou égale à 2 ppm. Avantageusement, le taux de dioxygène cible est compris entre 0,9 ppm et 2 ppm.

- 25 Préférentiellement, le taux de dioxygène cible est égal à 0,9 ppm.

Le régulateur 11 est agencé en outre pour déterminer une variation Δ_{regul} de débit d'argon requise en fonction de la différence entre le taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 11 et le taux de dioxygène cible SP. La sortie du régulateur 11 est donc un débit correspondant à une variation requise de débit d'argon.

Par ailleurs, le régulateur 11 est agencé en outre pour transmettre la variation Δ_{regul} de débit d'argon requise au contrôleur 13.

Selon un ou plusieurs modes de réalisation, le régulateur 11 est un régulateur PID ("*Proportionnel-Intégral-Dérivé*"). Ce cas est illustré en **Figure 4**.

- 5 Comme illustré en **Figure 4** sous forme de schéma fonctionnel (ou schéma-bloc), le régulateur 11 reçoit en entrée une valeur PV de taux de dioxygène mesurée par le capteur 9 ainsi qu'une valeur cible SP de taux de dioxygène. Le régulateur 11 est alors agencé pour mesurer la différence ε entre le taux de dioxygène PV mesuré et le taux de dioxygène cible SP, c'est-à-dire $\varepsilon = \text{PV} - \text{SP}$.
- 10 Dans le mode de réalisation décrit ici, le régulateur 11 est agencé par ailleurs pour déterminer une réponse proportionnelle, une réponse intégrale et une réponse dérivée à la différence ε . En d'autres termes, la variation Δ_{regul} de débit d'argon requise est de la forme suivante, après application de la transformée de Laplace :

$$\Delta_{\text{regul}}(p) = [G_p \times p + \frac{G_i}{p} + G_d \times p^2] \times \varepsilon(p)$$

- 15 Il est connu par ailleurs que la détermination de la sortie d'un régulateur PID peut comprendre d'autres opérations en complément de la détermination des réponses proportionnelle, intégrale et dérivée.

- Avantageusement, le régulateur 11 est configuré de sorte que les valeurs des paramètres G_p et G_i respectivement relatifs aux contributions proportionnelles et intégrales du régulateur 11 sont
- 20 multipliées par deux lorsque le taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 est supérieur au taux de dioxygène cible SP. Autrement dit, en adoptant les notations G_p^+ et G_i^+ dans le cas où le taux de dioxygène PV mesuré est supérieur au taux de dioxygène cible SP, et les notations G_p^- et G_i^- dans le cas où le taux de dioxygène PV mesuré est inférieur au taux de dioxygène cible SP, on a :

25
$$G_p^+ = 2 \times G_p^-$$

$$G_i^- = 2 \times G_i^+$$

Selon un mode de réalisation, le régulateur 11 est un régulateur PI ("*Proportionnel-Intégral*"). Autrement dit, dans ce mode de réalisation, le régulateur 11 est agencé pour déterminer une

réponse proportionnelle et une réponse intégrale à la différence ε entre le taux de dioxygène mesuré PV et le taux de dioxygène cible SP. Une autre manière de concevoir ce mode de réalisation est de considérer que le régulateur 11 est un régulateur PID dont la réponse dérivée est nulle. En d'autres termes :

5
$$G_d = 0$$

Bien entendu, l'homme du métier comprend qu'il est équivalent et tout aussi pertinent de mesurer la différence SP-PV au lieu de la différence PV-SP.

Comme illustré en **Figure 1** et en **Figure 4**, Le régulateur 11 comprend une mémoire 25 et un processeur 27.

- 10 La mémoire 25 est agencée pour stocker des instructions dont la mise en œuvre par le processeur 27 se traduit par le fonctionnement du régulateur 11.

Le contrôleur 13 est agencé pour recevoir la variation Δ_{regul} de débit d'argon requise déterminée par le régulateur 11. Par ailleurs, comme expliqué précédemment, le contrôleur 13 est également couplé au capteur 9 de sorte que le contrôleur 13 est agencé en outre pour recevoir
15 la valeur PV de taux de dioxygène du fluide 120 mesurée par le capteur 9 en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Avantagusement, ces données sont reçues par le contrôleur 13 en temps réel. A un instant t donné, le contrôleur 13 reçoit donc la valeur PV(t) de taux de dioxygène mesurée par le capteur 9 et la variation $\Delta_{\text{regul}}(t)$ de débit d'argon requise déterminée par le régulateur 11.

- 20 Le contrôleur 13 est agencé en outre générer un signal de commande relatif à un débit d'argon visé Q_{argon} . Le contrôleur 13 est agencé en outre pour transmettre le signal de commande à la vanne 15. Comme expliqué précédemment, la modification du débit d'argon en sortie de l'ensemble 1 impacte directement la teneur en dioxygène de ce fluide 120. Le débit d'argon visé Q_{argon} déterminé par le contrôleur 13 est donc déterminé en vue d'atteindre le taux de dioxygène
25 cible SP en sortie de l'ensemble 1. Comme expliqué précédemment, la valeur cible SP de taux de dioxygène est avantagusement égale à 0,9 ppm.

La détermination de la valeur cible SP de taux de dioxygène va à présent être explicitée en référence à la **Figure 5**. La **Figure 5** illustre, en fonction du taux de dioxygène du fluide 120 en sortie de l'ensemble 1, la quantité d'argon récupéré, dans le fluide 120 donc, par rapport à
30 la quantité d'argon dans le fluide 110 alimentant la dernière colonne de distillation de

l'ensemble 1. Dans l'exemple illustré en **Figure 1**, la dernière colonne de distillation de l'ensemble 1 correspond à la deuxième colonne de distillation 7.

En d'autres termes, la **Figure 5** illustre le ratio d'argon récupéré entre le fluide 110 en entrée de la dernière colonne de distillation de l'ensemble 1 et le fluide 120 en sortie de la dernière colonne de distillation de l'ensemble 1. Comme représenté, ce ratio augmente lorsque le taux de dioxygène augmente jusqu'à 0,9 ppm. A partir de 0,9 ppm, ce ratio est sensiblement constant. Par ailleurs, un taux de dioxygène trop élevé dans le fluide en sortie de l'ensemble 1 n'est pas non plus souhaitable puisque celui-ci doit être le plus pur possible. Par conséquent, il est particulièrement avantageux d'avoir un taux de dioxygène compris entre 0,9 ppm et 2 ppm pour atteindre un ratio maximal d'argon récupéré égal à 77%. Préférentiellement, le taux de dioxygène est égal à 0,9 ppm, à savoir la valeur minimale de taux de dioxygène permettant d'atteindre un ratio maximal d'argon récupéré.

Le débit d'argon visé Q_{argon} est déterminé en fonction de la variation Δ_{regul} de débit d'argon requise déterminée par le régulateur 11 et des variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9.

Comme expliqué précédemment, l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation est alimenté par le fluide 100 comprenant de l'argon. Dans l'exemple décrit ici, le fluide 100 est un fluide d'air au débit variable au cours du temps. Avantageusement, dans un ou plusieurs modes de réalisation, le débit d'argon visé Q_{argon} déterminé par le contrôleur 13 est déterminé en fonction en outre d'une valeur prédictive Q_{pred} du débit d'argon fonction du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation et d'un rendement ρ de l'ensemble 1.

Avantageusement, la valeur prédictive Q_{pred} du débit d'argon est fonction plus exactement d'un débit d'air retardé Q^*_{air} relatif au débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1. On comprend donc ici que, dans ce mode de réalisation particulier, la valeur de débit d'air utilisée pour la détermination de la valeur prédictive Q_{pred} est, non pas le débit réel d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1, mais un débit d'air retardé Q^*_{air} . L'utilisation de cette grandeur permet de prendre en compte le délai inhérent au fonctionnement de l'ensemble 1 en général et des colonnes de distillation, ici les colonnes de distillation 5 et 7, en particulier. Ainsi, une modification du débit d'air Q_{air} en entrée n'est réellement répercutée en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation qu'après un certain délai, d'où l'intérêt d'utiliser une grandeur, ici le débit d'air retardé Q^*_{air} , caractérisant ce délai.

Par ailleurs, du fait de la faible proportion d'argon dans l'air, et en particulier ici dans le fluide d'air 100, il est nécessaire de prendre en considération le délai pour « charger » la ou les colonnes de distillation de l'ensemble 1. Ainsi, la forte augmentation du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 crée une perturbation et entraîne un délai nécessaire pour adopter le bon profil de pureté d'argon au sein de l'ensemble 1. A l'inverse, lorsque le débit d'air en entrée augmente avec une pente faible ou décroît, le profil de pureté d'argon n'est que peu impacté et il demeure pertinent de prendre un compte directement le débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 plutôt que de retarder ce débit.

Le débit d'air retardé Q^*_{air} est illustré en **Figure 2** et sera explicité dans la suite de la description.

10 Comme illustré en **Figure 1**, le contrôleur 13 comprend une mémoire 25 et un processeur 27.

La mémoire 25 est agencée pour stocker des instructions dont la mise en œuvre par le processeur 27 se traduit par le fonctionnement du contrôleur 13.

La vanne 15 est agencée pour modifier le débit d'argon du fluide 120 en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation pour obtenir le débit d'argon visé Q_{argon} déterminé par le contrôleur 13. Comme expliqué précédemment, la modification du débit d'argon du fluide 120 induit une évolution de la teneur en dioxygène de ce même fluide 120. A titre d'exemple, la **Figure 3** illustre de telles variations du taux de dioxygène.

Typiquement, la vanne 15 comprend un actionneur et un conduit (non représentés sur la **Figure 1**).

20 L'actionneur est agencé pour modifier le débit du fluide, ici le fluide 120 en sortie de l'ensemble 1, s'écoulant le long du conduit de la vanne 15 de manière à obtenir le débit désiré. Dans le contexte de l'invention, la position de l'actionneur de la vanne est pilotée par le signal de commande émise par le contrôleur 13. En d'autres termes, la position de l'actionneur est fonction du débit d'argon visé.

25 Un procédé de contrôle du débit d'argon du fluide 120 en sortie de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation va maintenant être décrit en référence à la **Figure 6**.

L'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation est alimenté par le fluide 100 comprenant de l'argon. Dans l'exemple développé ici, le fluide 100 est un fluide d'air. Par ailleurs, comme expliqué précédemment, le débit d'air du fluide 100 varie au cours du temps. En référence à la **Figure 1**, un processus de distillation est mis en œuvre dans la première colonne de distillation

5 de manière à obtenir un fluide 110 dont le taux de dioxygène est plus élevé que celui du fluide 100. Le fluide 110 est ensuite injecté en entrée de la deuxième colonne de distillation 7 au sein de laquelle un processus de distillation est également mis en œuvre. Le fluide 120 en sortie de la deuxième colonne de distillation 7, donc de l'ensemble 1, est le fluide traité par le système 3.

- 5 Lors d'une première étape S1, le capteur 9 mesure la valeur $PV(t)$ du taux de dioxygène du fluide 120 à un instant t . Le taux de dioxygène du fluide 120 est avantageusement mesuré en temps réel.

La valeur $PV(t)$ du taux de dioxygène mesurée par le capteur 9 est transmise au régulateur 11 et au contrôleur 13.

- 10 Lors d'une deuxième étape S2, le régulateur 11 reçoit la valeur $PV(t)$ du taux de dioxygène mesurée par le capteur 9 à l'instant t . Par ailleurs, le régulateur 11 reçoit en outre la valeur cible SP du taux de dioxygène cible, à savoir le taux de dioxygène satisfaisant l'exigence de pureté en argon du fluide 120.

- Le régulateur 11 détermine la différence ε entre la valeur mesurée $PV(t)$ du taux de dioxygène et la valeur cible SP, aussi appelée consigne. Le régulateur 11 détermine, en fonction de la différence $\varepsilon = PV(t) - SP$ une variation Δ_{regul} de débit d'argon requise. D'ailleurs, cette variation étant déterminée, elle-aussi, en temps réel, on pourra également la noter $\Delta_{\text{regul}}(t)$ dans la suite de la description pour désigner la valeur de la variation de débit d'argon requise en réponse à la valeur mesurée $PV(t)$ du taux de dioxygène à l'instant t .
- 15

- 20 Dans le mode de réalisation illustré en **Figure 4**, le régulateur 11 est un régulateur PID. Dans ce mode de réalisation, la variation $\Delta_{\text{regul}}(t)$ de débit d'argon requise comprend une réponse proportionnelle, une réponse intégrale et une réponse dérivée à la différence ε entre la valeur $PV(t)$ de taux de dioxygène mesurée et la valeur SP de taux de dioxygène cible. Avantageusement, le régulateur 11 est un régulateur PI et la réponse dérivée est donc nulle.

- 25 La valeur de la variation $\Delta_{\text{regul}}(t)$ de débit d'argon requise est ensuite transmise au contrôleur 13.

- Lors d'une troisième étape S3, selon un ou plusieurs modes de réalisation, le débit d'air retardé Q^*_{air} est déterminé en fonction du débit d'air Q_{air} . Comme expliqué précédemment, le débit d'air Q_{air} du fluide d'air 100 en entrée de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation varie en
- 30 fonction du temps. Ces variations du débit d'air Q_{air} ont un impact sur le débit d'argon du fluide

120 en sortie de l'ensemble 1 et donc sur le taux de dioxygène du fluide 120. Par ailleurs, le ou les processus de distillation successivement mis en œuvre présentent un certain délai inhérent à l'ensemble 1. A titre d'exemple, une augmentation du débit d'air en entrée de 100 m³/h ne sera répercutée en sortie de l'ensemble 1 qu'après 40 minutes environ. Il est donc avantageux
 5 d'utiliser une valeur de débit d'air retardé $Q^*_{\text{air}}(t)$ plutôt que la valeur du débit d'air réel $Q_{\text{air}}(t)$ pour les calculs détaillés dans la suite du procédé.

Par exemple, le débit retardé Q^*_{air} est défini comme suit en fonction du débit d'air réel Q_{air} :

$$\begin{aligned} Q^*_{\text{air}}(t) &= Q_{\text{air}}(t) \text{ tant que } Q_{\text{air}}(t) - Q_{\text{air}}(t - \delta) < R \\ &\text{si, à } t = t_0, R \leq Q_{\text{air}}(t_0) - Q_{\text{air}}(t_0 - \delta), \text{ alors:} \\ 10 \quad Q^*_{\text{air}}(t) &= Q_{\text{air}}(t_0 - \lambda) \text{ pour tout } t \in [t_0; t_0 + \lambda[\end{aligned}$$

où :

- $Q^*_{\text{air}}(t)$ est le débit retardé à l'instant t ,
- $Q_{\text{air}}(t)$ est le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation à l'instant t ,
- 15 • t_0 est un instant quelconque,
- λ et δ sont des périodes de temps prédéterminées, et
- R est un seuil prédéterminé positif.

En d'autres termes, dans ce mode de réalisation, le débit d'air retardé Q^*_{air} est distinct du débit d'air réel Q_{air} lorsque le débit d'air réel Q_{air} augmente avec une pente élevée, c'est-à-dire une
 20 pente supérieure ou égale à une valeur prédéterminée, à savoir ici R/δ . Lorsqu'une pente élevée est détectée, la valeur du débit retardé $Q_{\text{air}}(t)$ est maintenue constante pendant une période de temps prédéterminée, ici notée λ .

On fait référence à présent à la **Figure 2** qui illustre les variations du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Dans l'exemple décrit ici, les conditions
 25 prédéterminées suivantes ont été définies :

$$\delta = 1 \text{ min}$$

$$R = 1 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\lambda = 40 \text{ min}$$

Comme illustré en **Figure 2**, le débit d'air réel Q_{air} augmente avec une pente forte, c'est-à-dire une augmentation d'environ $1,07 \text{ m}^3/\text{h}$ chaque minute, entre $t = 0 \text{ min}$ et $t = 140 \text{ min}$. Cette portion de la courbe du débit d'air réel Q_{air} est repérée par les extrémités A et B. Puisque la pente est forte, le débit retardé Q^*_{air} est distinct du débit d'air réel Q_{air} . Plus exactement, le débit d'air retardé Q^*_{air} est retardé de 40 minutes, période au cours de laquelle la valeur du débit retardé Q^*_{air} est maintenue constante, quelles que soient les variations du débit d'air réel Q_{air} sur cet intervalle de temps.

A titre d'exemple, à $t_0 = 80 \text{ min}$, la mesure indique que l'augmentation de débit sur 1 minute est supérieure au seuil R prédéterminé. La valeur du débit retardé $Q_{\text{air}}(t)$ est donc maintenue bloquée pendant 40 minutes, c'est-à-dire entre $t_0 = 80 \text{ min}$ et $t_0 + \lambda = 120 \text{ min}$. Par ailleurs, au cours de cette période de temps, la valeur du débit retardé $Q^*_{\text{air}}(t)$ est égale à $Q_{\text{air}}(t_0 - \lambda) = Q_{\text{air}}(40) \approx 97,9 \text{ m}^3/\text{h}$.

A partir de $t = 140 \text{ min}$, le débit d'air réel Q_{air} continue d'augmenter, mais avec une pente faible cette fois-ci, jusqu'à $t = 200 \text{ min}$. En effet, sur cet intervalle de temps délimité par les points B et C sur la courbe illustrée en **Figure 2**, le débit d'air réel Q_{air} augmente d'environ $0,42 \text{ m}^3/\text{h}$ chaque minute, ce qui est donc inférieur au seuil prédéterminé $R = 1 \text{ m}^3/\text{h}$. Puisque la pente est faible, le débit retardé Q^*_{air} est donc égal à Q_{air} mais seulement lorsque la période de temps de 40 minutes, toujours en cours à $t = 140 \text{ min}$, pendant laquelle la valeur du débit retardé $Q^*_{\text{air}}(t)$ est maintenue constante, s'achève, c'est-à-dire à $t = 160 \text{ min}$.

Enfin, sur la portion de courbe délimitée par les points D et E, la courbe du débit d'air réel Q_{air} est décroissante et la variation de débit d'air réel Q_{air} sur 1 minute reste inférieure au seuil prédéterminé $R = 1 \text{ m}^3/\text{h}$. Le débit d'air retardé Q^*_{air} est donc égal à Q_{air} entre $t = 200 \text{ min}$ et $t = 280 \text{ min}$.

Au cours de l'étape S3, donc, on détermine la valeur de débit d'air retardé $Q^*_{\text{air}}(t)$ à l'instant t . Cette valeur est par exemple déterminée par le contrôleur 13 qui reçoit donc, dans ce mode de réalisation, la mesure du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Alternativement, la valeur du d'air retardé $Q^*_{\text{air}}(t)$ est directement transmise au contrôleur 13.

Lors d'une étape S4, le contrôleur 13 détermine la valeur prédictive $Q_{\text{pred}}(t)$ du débit d'argon en fonction du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation et d'un rendement de l'ensemble 1. Selon un mode de réalisation, la valeur prédictive $Q_{\text{pred}}(t)$

est plus précisément déterminée en fonction, non du débit d'air Q_{air} en entrée de l'ensemble 1, mais du débit d'air retardé Q^*_{air} et du rendement de l'ensemble 1.

Par exemple, pour un instant t donné, la valeur prédictive $Q_{\text{pred}}(t)$ du débit d'argon est déterminée par le contrôleur 13 comme suit :

5
$$Q_{\text{pred}}(t) = Q^*_{\text{air}}(t) \times \alpha \times \rho$$

où :

- $Q_{\text{pred}}(t)$ est la valeur prédictive du débit d'argon à un instant t donné,
- α est la proportion d'argon dans le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
- 10 • ρ est le rendement de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation.

Typiquement, la proportion d'argon α dans le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est d'environ 0,93%.

Concernant le rendement ρ de l'ensemble 1, celui-ci est par exemple déterminé par application d'une fonction prédéterminée à un facteur caractérisant une quantité d'énergie utilisée pour le
15 fonctionnement de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation.

Avantageusement, la fonction prédéterminée est déterminée par un algorithme d'apprentissage sur la base d'un ensemble de données relatives à une pluralité de processus de distillation mis en œuvre selon différentes valeurs de quantité d'énergie sollicitée. En d'autres termes, on détermine la fonction prédéterminée en réalisant plusieurs processus de distillation en faisant
20 varier, d'un processus à l'autre, la quantité d'énergie sollicitée. On obtient alors un ensemble de points quantité d'énergie-rendement. Un algorithme d'apprentissage tel qu'une extrapolation de ces différents points permet de déterminer la fonction F .

Par exemple, la fonction prédéterminée est polynômiale. Typiquement, une telle fonction prédéterminée est une fonction polynômiale de degré inférieur ou égale à 2.

25 Lors d'une cinquième étape optionnelle S5, la valeur prédictive $Q_{\text{pred}}(t)$ de débit d'argon à un instant t est pondérée par un facteur correctif K relatif à des perturbations de l'ensemble 1 d'au moins une colonne de distillation. Le facteur correctif K est déterminé en fonction de la différence entre le taux de dioxygène mesuré $PV(t)$ par le capteur 9 et le taux de dioxygène cible SP .

Dans ou plusieurs modes de réalisation, le facteur correctif K est défini comme suit :

$$K = \begin{cases} K_1 \text{ si } PV(t) - SP \geq T_1 \\ K_2 \text{ si } T_2 < PV(t) - SP < T_1 \\ K_3 \text{ si } PV(t) - SP \leq T_2 \end{cases}$$

où :

- K_1 , K_2 et K_3 sont des valeurs prédéterminées possibles du facteur correctif, et
- T_1 et T_2 sont des seuils prédéterminés.

On fait référence à présent à la **Figure 3** qui illustre un exemple de variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 en sortie de l'ensemble 1. Dans l'exemple décrit ici, les conditions prédéterminées suivantes ont été définies :

$$SP = 0,9 \text{ ppm}$$

$$T_1 = 0,05 \text{ ppm}$$

$$T_2 = -0,05 \text{ ppm}$$

$$K_1 = 0,75$$

$$K_2 = 0,9$$

$$K_3 = 1$$

Comme illustré sur la **Figure 3**, la valeur du facteur correctif K est K_1 lorsque la valeur PV(t) du débit d'argon mesurée par le capteur 9 est supérieure ou égale à 0,95 ppm. Lorsque la valeur PV(t) du débit d'argon mesurée par le capteur 9 est supérieure à 0,85 ppm et inférieure à 0,95 ppm, la valeur du facteur correctif K est K_2 . Enfin, la valeur du facteur correctif K est K_3 lorsque la valeur PV(t) du débit d'argon mesurée par le capteur 9 est inférieure ou égale à 0,85 ppm.

L'utilisation du facteur correctif K pour pondérer la valeur prédictive Q_{pred} du débit d'argon permet de prendre en compte l'inertie importante de l'ensemble 1 lorsque celui-ci rencontre des perturbations extérieures ou un changement de fonctionnement notable.

Lors d'une sixième étape S6, un paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 est déterminé, par exemple par le contrôleur 13. Le paramètre d'anticipation P prend des valeurs discrètes dans un ensemble de valeurs prédéterminées.

Comme expliqué précédemment, le système 3 utilise un régulateur 11 qui est, typiquement, un régulateur PID. L'utilisation d'un tel régulateur induit une variation du débit d'argon du fluide 120, à savoir la variation Δ_{regul} discutée jusqu'à présent. L'évolution au cours du temps du taux de dioxygène dans le fluide 120 en sortie de l'ensemble 1 a un profil similaire à celui de la courbe illustrée en **Figure 3**. On observe, typiquement, quatre points d'inflexion, notés respectivement W, X, Y et Z sur la **Figure 3**.

Comme illustré, le point W marque le début d'une forte augmentation du taux de dioxygène, tandis que le point X marque la fin de cette forte augmentation et le début d'une phase au cours de laquelle le taux de dioxygène est sensiblement constant. Le point Y marque le début d'une forte diminution du taux de dioxygène, tandis que le point Z marque la fin de cette forte diminution et le début d'une phase au cours de laquelle le taux de dioxygène est à nouveau sensiblement constant. De telles variations sont bien entendues amener à se répéter au cours du temps.

Le paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 s'appuie sur le fait que ces variations, en grande partie dues au mode de fonctionnement du régulateur 11, ont un profil connu à l'avance et qui peut donc être anticipé. Par ailleurs, le régulateur PID n'est bien souvent pas adapté pour réguler des variations non linéaires, ce qui est le cas ici, comme illustré en **Figure 3**, avec les variations du taux de dioxygène en sortie de l'ensemble 1. Cette non-linéarité est principalement due au fait que le taux de dioxygène mesuré correspond au taux de dioxygène du fluide 120 extrait de la partie supérieure de la colonne de distillation, ici la deuxième colonne de distillation 7. Dans la partie supérieure de la colonne de distillation, les variations du taux de dioxygène sont non-linéaires et, de ce fait, la sortie du régulateur 11 ne permet pas de réguler de manière satisfaisante le taux de dioxygène. On comprend donc que le paramètre d'anticipation P vise à compenser l'inaptitude relative du régulateur 11 à réguler dans le cas de non-linéarité.

Le paramètre d'anticipation P est défini pour prendre des valeurs discrètes dans un ensemble de valeurs prédéterminées en fonction de la position courante sur la courbe du taux de dioxygène PV mesuré.

Par exemple, le paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène est défini comme suit :

$$P(t) = \begin{cases} P_1 & \text{si } |PV(t) - PV(t - \tau)| \leq S \\ P_2 & \text{si } PV(t) - PV(t - \tau) > S \\ P_3 & \text{si } PV(t) - PV(t - \tau) < -S \end{cases}$$

où :

- $P(t)$ est la valeur du paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur à l'instant t ,
 - 5 • P_1, P_2, P_3 sont des valeurs possibles du paramètre d'anticipation selon les variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur,
 - $PV(t)$ est la valeur du taux de dioxygène mesuré par le capteur à l'instant t ,
 - τ est une période de temps prédéterminée, et
 - S est un seuil prédéterminé.
- 10 Dans ce mode de réalisation, l'ensemble de valeurs prédéterminées comprend donc une première valeur prédéterminée P_1 , une deuxième valeur prédéterminée P_2 et une troisième valeur prédéterminée P_3 .

En considérant l'exemple illustré en **Figure 3**, le paramètre d'anticipation P prend la valeur P_1 sur la portion de courbe avant le point W, entre le point X et le point Y, et après le point Z. Le

15 paramètre d'anticipation P prend la valeur P_2 sur la portion de courbe comprise entre le point W et le point X. Enfin, le paramètre d'anticipation P prend la valeur P_3 sur la portion de courbe comprise entre le point Y et le point Z.

Par ailleurs, ce paramètre d'anticipation peut être de nature différente selon les modes de réalisation et donc être utilisé différemment d'un mode de réalisation à l'autre dans la

20 détermination, par le contrôleur 13, du débit d'argon Q_{argon} visé.

Ainsi, dans un mode de réalisation, le paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 est un débit correctif. A titre d'exemple, les valeurs discrètes par le paramètre d'anticipation P sont les suivantes :

$$P_1 = 0 \text{ m}^3/\text{h}$$

25 $P_2 = -75 \text{ m}^3/\text{h}$

$$P_3 = 55 \text{ m}^3/\text{h}$$

Alternativement, le paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 est un coefficient de pondération de la valeur prédictive Q_{pred} du débit d'argon. A titre d'exemple, les valeurs discrètes par le paramètre d'anticipation P sont les suivantes :

$$P_1 = 1$$

$$P_2 = 0,95$$

$$P_3 = 1,05$$

Lors d'une septième étape S7, le contrôleur 13 détermine le débit d'argon Q_{argon} visé. On comprend par ailleurs de ce qui précède que le débit d'argon visé Q_{argon} est avantageusement déterminé en temps réel puisque celui-ci dépend de la variation Δ_{regul} de débit d'argon requise déterminée par le régulateur et de variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 en temps réel.

Comme expliqué précédemment, le paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 est, selon un mode de réalisation un débit correctif.

Le débit d'argon visé Q_{argon} est alors déterminé comme suit :

$$Q_{\text{argon}} = Q_{\text{pred}} + \Delta_{\text{regul}} + P$$

où :

- Q_{argon} est le débit d'argon visé,
- Q_{pred} est la valeur prédictive du débit d'argon,
- Δ_{regul} est une variation de débit d'argon requise, et
- P la valeur du débit correctif.

Par ailleurs, dans le mode de réalisation correspondant à l'étape optionnelle S5, dans lequel un facteur correctif K est déterminé, le débit d'argon Q_{argon} est déterminé comme suit :

$$Q_{\text{argon}} = K \times Q_{\text{pred}} + \Delta_{\text{regul}} + P$$

Alternativement, le paramètre d'anticipation P relatif aux variations du taux de dioxygène PV mesuré par le capteur 9 est un coefficient de pondération de la valeur prédictive Q_{pred} du débit d'argon.

Le débit d'argon visé Q_{argon} est alors déterminé comme suit :

$$Q_{\text{argon}} = Q_{\text{pred}} \times P + \Delta_{\text{regul}}$$

où :

- Q_{argon} est le débit d'argon visé,
- Q_{pred} est la valeur prédictive du débit d'argon,
- 5 • Δ_{regul} est une variation de débit d'argon requise, et
- P la valeur du coefficient de pondération de la valeur prédictive du débit d'argon.

En combinaison avec le mode de réalisation dans lequel un facteur correctif K est déterminé, le débit d'argon Q_{argon} est déterminé comme suit :

$$Q_{\text{argon}} = K \times Q_{\text{pred}} \times P + \Delta_{\text{regul}}$$

- 10 Le contrôleur 13 génère alors un signal de commande au débit d'argon visé Q_{argon} déterminé. Ce signal de commande est émis à destination de la vanne 15 du système 3.

- Lors d'une huitième étape S8, la vanne 15 reçoit le signal de commande émis par le contrôleur 13. Ce signal de commande est caractéristique du débit d'argon visé Q_{argon} . Sur réception de ce signal de commande, la position de l'actionneur de la vanne 15 est modifiée de sorte que le
- 15 débit du fluide 120, s'écoulant dans le conduit de la vanne 15, atteigne le débit d'argon Q_{argon} visé. La modification, à l'aide de la vanne 15 pilotée par le contrôleur 13, permet d'impacter directement le taux de dioxygène du fluide 120 en vue d'atteindre le taux de dioxygène cible SP. Comme expliqué précédemment, le taux de dioxygène cible est typiquement inférieur à 2 ppm, préférentiellement égal à 0,9 ppm.

- 20 La présente invention présente plusieurs avantages.

Tout d'abord, l'utilisation de la valeur de taux de dioxygène mesurée en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation permet d'avoir des données plus pertinentes pour déterminer le débit d'argon permettant d'atteindre le taux de dioxygène cible.

- La prise en compte de l'inertie importante du processus de distillation et du délai nécessaire à
- 25 l'ensemble d'au moins une colonne de distillation pour répercuter en sortie les variations du débit d'air en entrée ou la modification de la consigne permettent également d'améliorer la détermination du débit d'argon visé en anticipant les conditions du processus de distillation.

Enfin, le paramètre d'anticipation permet d'anticiper les variations du taux de dioxygène induites par l'utilisation d'un régulateur, et plus spécifiquement d'un régulateur PID, et donc

d'atteindre plus rapidement et de manière plus fiable le taux de dioxygène cible. Ce paramètre d'anticipation permet donc de compenser le biais introduit par l'utilisation d'un régulateur. Par ailleurs, le taux de dioxygène utilisé ici est non-linéaire puisqu'il est mesuré sur le fluide de sortie, donc le fluide issu de la partie supérieure d'une colonne de distillation. Un régulateur, et
5 plus particulièrement un régulateur PID, n'est pas adapté pour gérer cette non-linéarité, d'où l'utilisation du paramètre d'anticipation en complément du régulateur, ce paramètre d'anticipation étant adapté à la non-linéarité du taux de dioxygène du fluide de sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation.

Typiquement pour toutes les figures, la colonne 5 est une double colonne de séparation d'air
10 comprenant une colonne moyenne pression couplé thermiquement à une colonne basse pression, la colonne basse pression étant alimentée par un fluide enrichi en azote et un fluide enrichi en oxygène provenant de la colonne moyenne pression. Le débit 110 est un débit enrichi en argon provenant de la colonne basse pression qui est envoyé à la colonne argon 7. Le fluide 120 riche en argon est produit par la colonne argon 7.

Revendications

- 5 1. Système (3) de contrôle d'un débit d'argon d'un fluide (120) en sortie d'un ensemble (1) d'au moins une colonne de distillation pour atteindre un taux de dioxygène cible (SP), le système comprenant :
- 10 - un capteur (9) agencé pour mesurer un taux de dioxygène (PV) dans un fluide comprenant de l'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
- un régulateur (11) agencé pour déterminer une variation (Δ_{regul}) de débit d'argon requise en fonction de la différence (ε) entre le taux de dioxygène mesuré par le capteur et un taux de dioxygène cible,
- 15 - un contrôleur (13) agencé pour générer un signal de commande relatif à un débit d'argon visé (Q_{argon}), ledit débit d'argon visé étant déterminé en fonction de la variation de débit d'argon requise déterminée par le régulateur et de variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur et
- 20 - une vanne (15), pilotée par ledit contrôleur, agencée pour modifier le débit d'argon du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation pour obtenir le débit d'argon visé.
2. Système selon la revendication 1, dans lequel l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est alimenté par un fluide d'air (100), le débit d'argon visé déterminé par le contrôleur étant déterminé en fonction en outre d'une valeur prédictive (Q_{pred}) du débit d'argon fonction du débit d'air (Q_{air}) en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation et d'un rendement (ρ) dudit ensemble.
- 25 3. Système selon la revendication 2, dans lequel la valeur prédictive du débit d'argon est fonction d'un débit d'air retardé (Q_{air}^*) relatif au débit d'air en entrée de l'ensemble (1) d'au moins une colonne de distillation, ledit débit d'air retardé étant défini comme suit :
- 30

$$Q_{\text{air}}^*(t) = Q_{\text{air}}(t) \text{ tant que } Q_{\text{air}}(t) - Q_{\text{air}}(t - \delta) < R$$

$$\text{si, à } t = t_0, R \leq Q_{\text{air}}(t_0) - Q_{\text{air}}(t_0 - \delta), \text{ alors:}$$

$$Q_{\text{air}}^*(t) = Q_{\text{air}}(t_0 - \lambda) \text{ pour tout } t \in [t_0; t_0 + \lambda]$$

où :

- $Q_{\text{air}}^*(t)$ est le débit retardé à l'instant t ,
- $Q_{\text{air}}(t)$ est le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation à l'instant t ,
- 5 • t_0 est un instant quelconque,
- λ et δ sont des périodes de temps prédéterminées,
- R est un seuil prédéterminé positif.

4. Système selon la revendication 3, dans lequel la valeur prédictive du débit d'argon à un instant donné est déterminée comme suit :

$$Q_{\text{pred}}(t) = Q_{\text{air}}^*(t) \times \alpha \times \rho$$

où :

- $Q_{\text{pred}}(t)$ est la valeur prédictive du débit d'argon à un instant t donné,
 - 15 • α est la proportion d'argon dans le débit d'air en entrée de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
 - ρ est le rendement de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
5. Système selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel le rendement de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est déterminé par application d'une fonction prédéterminée à un facteur caractérisant une quantité d'énergie utilisée pour le fonctionnement de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation.
- 20
6. Système selon la revendication 5, dans lequel la fonction prédéterminée est déterminée par un algorithme d'apprentissage sur la base d'un ensemble de données relatives à une pluralité de processus de distillation mis en œuvre selon différentes valeurs de quantité d'énergie sollicitée.
- 25
7. Système selon la revendication 6, dans lequel la fonction prédéterminée est polynômiale.
- 30
8. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le débit d'argon visé est déterminé en fonction d'un paramètre d'anticipation (P) relatif aux variations du taux

de dioxygène mesuré par le capteur, ledit paramètre d'anticipation prenant des valeurs discrètes dans un ensemble de valeurs prédéterminées.

9. Système selon la revendication 8, dans lequel le paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène est défini comme suit :

$$P(t) = \begin{cases} P_1 & \text{si } |PV(t) - PV(t - \tau)| \leq S \\ P_2 & \text{si } PV(t) - PV(t - \tau) > S \\ P_3 & \text{si } PV(t) - PV(t - \tau) < -S \end{cases}$$

où :

- $P(t)$ est la valeur du paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur à l'instant t ,
- P_1, P_2, P_3 sont des valeurs possibles du paramètre d'anticipation selon les variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur,
- $PV(t)$ est la valeur du taux de dioxygène mesuré par le capteur à l'instant t ,
- τ est une période de temps prédéterminée, et
- S est un seuil prédéterminé.

15

10. Système selon la revendication 9 prise en combinaison avec la revendication 2, dans lequel le paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur est un débit correctif, le débit d'argon visé étant déterminé comme suit :

$$Q_{\text{argon}} = Q_{\text{pred}} + \Delta_{\text{regul}} + P$$

20

où :

- Q_{argon} est le débit d'argon visé,
- Q_{pred} est la valeur prédictive du débit d'argon,
- Δ_{regul} est une variation de débit d'argon requise, et
- P la valeur du débit correctif.

25

11. Système selon la revendication 9 prise en combinaison avec la revendication 2, dans lequel le paramètre d'anticipation relatif aux variations du taux de dioxygène mesuré par le capteur est un coefficient de pondération de la valeur prédictive du débit d'argon, le débit d'argon visé étant déterminé comme suit :

30

$$Q_{\text{argon}} = Q_{\text{pred}} \times P + \Delta_{\text{regul}}$$

où :

- Q_{argon} est le débit d'argon visé,
- Q_{pred} est la valeur prédictive du débit d'argon,
- Δ_{regul} est une variation de débit d'argon requise, et
- P la valeur du coefficient de pondération de la valeur prédictive du débit d'argon.

5

12. Système selon l'une des revendications 2 à 11, dans lequel la valeur prédictive de débit d'argon est pondérée par un facteur correctif (K) relatif à des perturbations de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation, ledit facteur correctif étant déterminé en fonction de la différence entre le taux de dioxygène mesuré par le capteur et le taux de dioxygène cible.

10

13. Système selon la revendication 12, dans lequel le facteur correctif est défini comme suit :

$$K = \begin{cases} K_1 \text{ si } PV(t) - SP \geq T_1 \\ K_2 \text{ si } T_2 < PV(t) - SP < T_1 \\ K_3 \text{ si } PV(t) - SP \leq T_2 \end{cases}$$

15

où :

- K_1 , K_2 et K_3 sont des valeurs prédéterminées possibles du facteur correctif, et
- T_1 et T_2 sont des seuils prédéterminés.

20

14. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le régulateur est un régulateur PID (« *Proportionnel-Intégral-Dérivé* ») configuré de sorte que les valeurs des paramètres respectivement relatifs aux contributions proportionnelles et intégrales du régulateur PID sont multipliées par deux lorsque le taux de dioxygène mesuré par le capteur est supérieur au taux de dioxygène cible.

25

15. Système selon la revendication 14, dans lequel le régulateur PID est un régulateur PI.

16. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le taux de dioxygène cible du fluide d'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est inférieur à 2 ppm.

30

17. Système selon la revendication 16, dans lequel le taux de dioxygène cible du fluide d'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est compris entre 0,9 ppm et 2 ppm.
- 5 18. Système selon la revendication 16 ou 17, dans lequel le taux de dioxygène cible du fluide d'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation est égal à 0,9 ppm.
- 10 19. Procédé de contrôle d'un débit d'argon d'un fluide (120) en sortie d'un ensemble (1) d'au moins une colonne de distillation pour atteindre un taux de dioxygène cible (SP), le procédé comprenant :
- mesurer un taux de dioxygène (PV) dans un fluide comprenant de l'argon en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation,
 - déterminer une variation (Δ_{argon}) de débit d'argon requise en fonction de la
 - 15 différence (ϵ) entre le taux de dioxygène mesuré et un taux de dioxygène cible,
 - déterminer, en fonction de la variation de débit d'argon requise et de variations du taux de dioxygène mesuré, un débit d'argon visé (Q_{argon}), et
 - modifier le débit d'argon du fluide en sortie de l'ensemble d'au moins une colonne de distillation pour obtenir le débit d'argon visé.
- 20 20. Programme informatique comprenant des instructions pour la mise en œuvre du procédé selon la revendication 19, lorsque lesdites instructions sont exécutées par au moins un processeur (19, 23, 27).